

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MAQUINAGEM NO DANO DE PLACAS COMPÓSITAS

L. M. P. Durão¹, A. G. Magalhães¹, A. T. Marques², João Manuel R. S. Tavares²

¹ Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica,
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

² Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RESUMO

Os materiais compósitos têm-se tornado cada vez mais importantes em virtude das suas características específicas, tais como o baixo peso e uma boa relação peso/resistência. As operações de furação são habituais neste tipo de peças, devido à necessidade de posterior montagem em conjuntos. Devido à não-homogeneidade dos compósitos, a furação pode causar alguns danos, de que podem resultar perda de propriedades mecânicas da peça. Uma escolha adequada da ferramenta e dos parâmetros pode diminuir estas consequências. Neste artigo são comparados os resultados obtidos com três diferentes velocidades de corte, três avanços e três geometrias de ferramenta. As conclusões apontam para a importância de uma adequada selecção dos parâmetros de maquinagem na redução do dano.

1- INTRODUÇÃO

O uso crescente de materiais compósitos em estruturas tem permitido uma significativa redução de peso e uma melhoria das suas características dinâmicas relacionadas com uma relação resistência-peso favorável. É possível encontrar exemplos da sua utilização nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automóvel, construção naval ou ferroviária. As operações de furação são necessárias em placas compósitas para permitir a posterior montagem a outras peças da mesma estrutura. A furação pode causar diferentes tipos de dano, como a delaminação, descolamento fibra/matriz, fractura interlaminar ou danos térmicos.

A delaminação é consequência da força compressiva exercida pela broca sobre as camadas não cortadas do laminado. Estas camadas, localizadas por baixo da broca, tendem a ser empurradas para fora da placa, forçando a quebra das ligações entre as diversas camadas. À medida que a ponta da broca se aproxima do final da placa, a espessura não cortada diminui e a resistência à deformação é menor. Num certo momento, a força

exercida pela broca excede a resistência interlaminar da placa, antes que a broca penetre completamente a placa. Nesse instante, ocorre a delaminação (figura 1).



Fig 1 – Mecanismo de delaminação

Qualquer um destes danos é indesejável, podendo levar à necessidade de maquinagem adicional na peça ou mesmo a sua rejeição. Este tipo de dano é de difícil detecção numa inspecção visual e pode reduzir a capacidade de suporte de carga da placa, nomeadamente sob esforços de compressão [Abrate (1997)].

Têm sido apresentadas várias abordagens para a redução da delaminação. Destacam-se os trabalhos de Piquet [Piquet et al (2000)] sobre o uso de brocas de tipo especial em laminados carbono/epóxico, e de Persson [Persson et al (1997)] sobre o efeito da delaminação na resistência à fadiga das placas laminadas. Outros trabalhos têm permitido diferentes abordagens para o mesmo problema

[Hocheng et al (1992)], [Won & Dharan (2002)], [Tsao & Hocheng (2003)], [Enemuoh et al (2001)]. Uma revisão dos principais passos na procura de furos sem dano pode ser encontrada em Hocheng e Tsao [Hocheng & Tsao (2005)].

Neste artigo três geometrias de broca, todas de 6mm de diâmetro são comparadas. São avaliados os parâmetros de corte – avanços e velocidades – distinguindo-se entre baixo, médio e alto. Durante a furação as forças de corte são monitorizadas e após a furação o dano é avaliado por intermédio de radiografias. Baseados nos resultados obtidos é indicado o conjunto de parâmetros que otimiza o dano na peça. São ainda estabelecidos os efeitos das diferentes geometrias de ferramenta na ocorrência da delaminação.

2–CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO DANO

Depois da operação de furação, é importante estabelecer critérios que permitam comparar a extensão do dano utilizando diferentes estratégias de maquinagem. A avaliação da extensão do dano pode ser efectuada através de radiografias, análise ultrassónica com varrimento (C-Scan) ou tomografia computadorizada (TAC) [Chen, (1997)], [Mehta et al (1992)] e [Tsao & Hocheng (2005)].

Um dos critérios de avaliação é o *Factor de delaminação* – F_d – [Chen (1997)], definido como o quociente entre o máximo diâmetro de delaminação e o diâmetro nominal do furo

$$F_d = D_{\max} / D$$

3–TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 – Procedimento dos ensaios de furação

Para a execução do trabalho experimental, foi fabricada uma placa a partir de carbono/epóxico pré-impregnado, com uma sequência de empilhamento [(0/-45/90/45)]_{4s}, resultando uma placa com

propriedades quasi-isotrópicas. O laminado foi sujeito a um ciclo de cura numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa e uma temperatura de 140 °C durante uma hora, seguido de arrefecimento ao ar. A espessura final das placas é de 4mm. Os diferentes parâmetros de corte utilizados podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros experimentais.

	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de rotação [rpm]	Avanço [mm/rev]
Baixa	53	2800	0.025
Média	80	4200	0.050
Alta	102	5600	0.075

As três brocas experimentadas eram uma broca helicoidal, uma broca tipo ‘Brad’ e uma broca experimental, bi-diametral.

3.2 – Uso de técnicas de inspecção

As placas furadas foram analisadas através de radiografia após imersão em líquido contrastante. Como resultado desta inspecção obtêm-se imagens em tons de cinzento, em que a zona mais escura corresponde à área de dano e a zona mais clara à área sem dano (figura 2). A região de dano localiza-se numa zona circular à volta do furo.

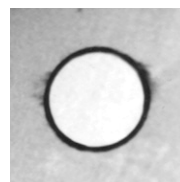


Figura 2 – Radiografia de uma placa

De forma a obter as medidas necessárias para a avaliação do dano nas peças a partir das imagens de resultados obtidas por radiografia (área delaminada, área do furo, máximo diâmetro delaminado e diâmetro do furo), utilizou-se uma plataforma de processamento e análise de imagem previamente desenvolvida para ambientes *Microsoft Windows* [Tavares, (2000); Tavares et al (2002)]. Com a referida plataforma foi possível aplicar às imagens obtidas nos ensaios experimentais, técnicas usuais de processamento e análise de imagem: filtragem, segmentação e análise de

regiões, [Awcock & Thomas (1995); Jain et al (1995); Schalkoff (1989)].

Assim, o método de processamento e análise considerado é constituído por uma sequência de etapas para obter o cálculo das medidas necessárias (áreas e comprimentos).

4- RESULTADOS

Os resultados apresentados dividem-se em: força axial máxima durante a furação (figura 3); extensão da delaminação medida através das técnicas descritas (figura 4).

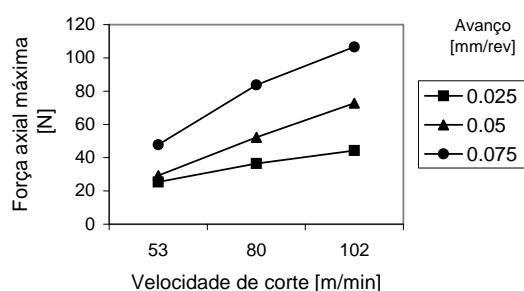


Figura 3: Força axial máxima durante a furação para diferentes velocidades e avanços (broca helicoidal).

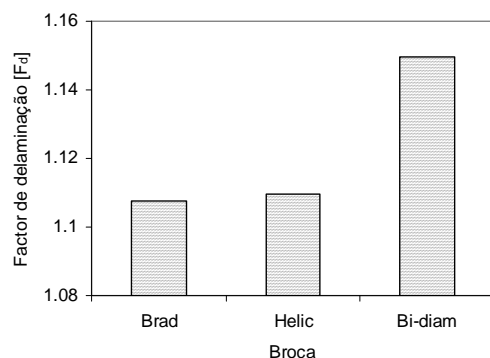


Figura 4: Resultados do Factor de delaminação – F_d – para diferentes brocas.

5 - CONCLUSÕES

Foram efectuados ensaios de furação em placas carbono/epóxico com o objectivo de obter uma correlação entre os parâmetros de maquinagem e o dano. Três velocidades de corte e avanços foram comparados, bem como três geometrias de ferramenta. Dos resultados apresentados é possível retirar algumas conclusões

relacionadas com os parâmetros de maquinagem e a escolha da geometria de ferramenta.

O recurso a avanços baixos e velocidades de corte baixas parece ser o mais apropriado. A geometria de ferramenta mostrou ter influência nos resultados de delaminação. A broca ‘Brad’ apresentou os melhores resultados nas condições experimentais utilizadas.

REFERÊNCIAS

- E. Persson, I. Eriksson and L. Zackrisson, Composites A, 28, 1997, 141-151.
- S. Abrate, Composites Engineering Handbook, Marcel Dekker, New York, 1997, 777-809.
- R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud and P. Swider, Composites A, 31, 2000, 1107-1115.
- E. Persson, I. Eriksson and P. Hammersberg, J. Composite Materials, 31, 4, 1997, 383-408.
- H. Hocheng, H. Puw and K. C. Yao, Machining Composite Materials Symp., ASM Materials Week 1992, 127-138.
- Won, M. S. and Dharan, C. H. K., Trans. ASME J. Manuf. Science and Eng., 124, 242-247, 2002.
- C. C. Tsao and H. Hocheng, Int. J. Machine Tools & Manuf., 43, 2003, 1087-1092.
- E. U. Enemuoh, A. S. El-Gizawy and A. C. Okafor, Int. J. Machine Tools & Manuf., 41, 2001, 1795-1814.
- H. Hocheng and C. C. Tsao, J. Materials Proc. Technology, 167, 2005, 251-264.
- W. C. Chen, Int. J. Machine Tools & Manufacture, 37, 1997, 1097-1108.
- C. C. Tsao and H. Hocheng, Int. J. Machine Tools & Manuf., 45, 2005, 1282-1287.
- J. M. R. S. Tavares, Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional, PhD thesis, FEUP, 2000.
- J. M. R. S. Tavares, J. G. Barbosa and A. J. Padilha, RESI – Revista Electrónica de Sistemas de Informação, vol. 1, 2002.
- G.W.Awcock and R.Thomas, Applied image process., McGRAW-HILL Int., NY, 1995.
- R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck, Machine Vision McGRAW-HILL International Editions, New York, 1995.
- R. J. Schalkoff, Digital image process. and computer vision”, John Wiley&Sons,1989.